



WORKING PAPERS

W.P. 45

IL SISTEMA DEI TRASPORTI NELLA PIANIFICAZIONE REGIONALE E LOCALE

C.S. Bertuglia, G. Leonardi



INDICE



1. INTRODUZIONE	1
2. I TRASPORTI A SCALA URBANA	3
2.1. Caratteristiche della domanda di trasporto a scala urbana	3
2.2. Interazioni tra domanda ed offerta di trasporto a scala urbana	12
3. IL SISTEMA DEI TRASPORTI NELLA PIANIFICAZIONE REGIONALE E LOCALE	19
4. CONCLUSIONI	13
5. RAPPRESENTAZIONI BIBLIOGRAFICHE	23

W.P. 45

C.S. Bertuglia, G. Leonardi

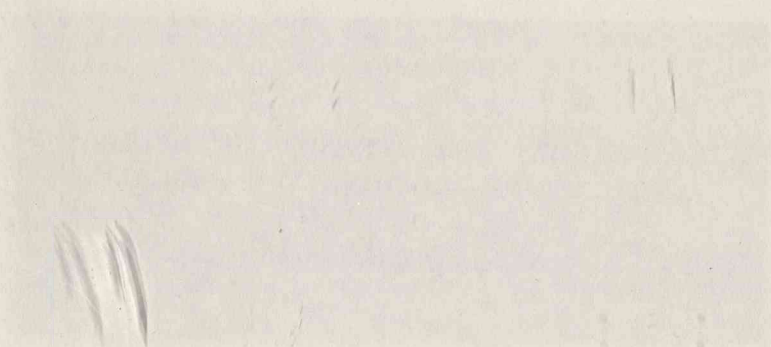
ERRATA CORRIGE

Pag. 2
1° riga dall'alto
intercomunale, leggere interurbane

Marzo 1985

Pag. 3
1° riga dall'alto
caratteristica, leggere deterministica

Pag. 7
5° riga dal basso
sistematica, leggere sistematica



1964, January 19-22, at Montreal
2nd to 4th years of the Faculty of Medicine, Montreal, 1964

INDICE

	Pag.
1. INTRODUZIONE	1
2. I TRASPORTI A SCALA URBANA	3
2.1. Caratteristiche della domanda di trasporto a scala urbana	3
2.2. Interazioni tra domanda ed offerta di tra sporto a scala urbana	12
3. I TRASPORTI A SCALA INTERURBANA	19
4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	23
- RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	25

ERRATA CORRIGE

Pag. 2

1^a riga dall'alto:

intercomunale, leggasi interurbana

Pag. 3

6^a riga dall'alto

caratterizzata, leggasi caratterizzati

Pag. 7

6^a riga dal basso

scostamento, leggasi spostamento

Pag. 12

2^a riga di testo dall'alto

della, leggasi delle

1. INTRODUZIONE

Occorre, preliminarmente, definire cosa si intende per scala regionale e per scala locale nella trattazione dei trasporti.

Benché i termini "regionale" e "locale" spesso implicino un riferimento a livelli amministrativi, in questo caso il riferimento è al diverso modo di manifestarsi del fenomeno dei trasporti. Tale accezione è più vicina a quella della Scienza Regionale, anche se non necessariamente in conflitto con quella amministrativa.

Posto ciò, identifichiamo la scala locale con quella urbana e, per conseguenza, la scala regionale con quella interurbana. Ne consegue che, quando in questo saggio si userà il termine locale, esso starà per urbano; quando si userà il termine regionale, esso starà per interurbano.

Ciò posto, si deve aggiungere che spostamenti sia di persone sia di merci sono, ovviamente, presenti sia alla scala urbana sia a questa interurbana.

Gli spostamenti di persone saranno trattati, in modo ampio, con riferimento alla scala urbana. I modelli, che saranno introdotti per la scala urbana, valgono anche per la scala interurbana.

Per studiare gli spostamenti di merci, non si può fare a meno di considerare la scala interurbana. Infatti, anche qualora si debba condurre uno studio per una singola area urbana, e si voglia evitare di trattare le merci in modo aggregato, è necessario ampliare l'area di studio dal contesto urbano ad un contesto interurbano, per poter ottenere una corretta comprensione e modellazione del fenomeno. Infatti, gli studi sugli spostamenti di merci, e non a caso, fan-

no generalmente riferimento alla scala intercom^{urbana}unale. Ne consegue che gli spostamenti di merci saranno qui trattati alla scala interurbana.

La domanda di trasporto alla scala urbana è caratterizzata da frequenza e ripetitività giornaliere degli spostamenti. Ciò vale, in particolare, per gli spostamenti aventi carattere pendolare, cioè per gli spostamenti caratterizzati da uno schema di andata e ritorno da casa ad una qualche attività e, inoltre, da una concentrazione in un arco di tempo limitato (ore di punta) sia dell'uno sia dell'altro spostamento.

I principali spostamenti aventi carattere pendolare sono quelli tra residenza e posto di lavoro e quelli tra residenza e scuola.

Gli spostamenti verso le attività commerciali e gli altri servizi urbani non seguono, in generale, uno schema di tipo pendolare e possono essere distribuiti più irregolarmente nell'arco della giornata; tuttavia, permane la caratteristica di alta frequenza, soprattutto per gli spostamenti verso i servizi commerciali di tipo di consumo giornaliero.

In tutti i tipi di spostamenti citati, si possono riconoscere gli elementi fondamentali per l'analisi della domanda di trasporto, che sono i seguenti:

a. la generazione della domanda totale, cioè il problema dell'identificazione del tipo di popolazione interessata ai diversi tipi di spostamenti (per esempio, la popolazione attiva per gli spostamenti casa-lavoro; la popolazione in età scolare per gli spostamenti casa-scuola; tutta la popolazione per gli spostamenti verso gli altri servizi). In generale, la domanda totale effettiva non è uguale

2. I TRASPORTI A SCALA URBANA

2.1. Caratteristiche della domanda di trasporto a scala urbana

La domanda di trasporto alla scala urbana è caratterizzata da frequenza e ripetitività giornaliera degli spostamenti. Ciò vale, in particolare, per gli spostamenti aventi carattere pendolare, cioè per gli spostamenti caratterizzati da uno schema di andata e ritorno da casa ad una qualche attività e, inoltre, da una concentrazione in un arco di tempo limitato (ora di punta) sia dell'uno sia dell'altro spostamento.

I principali spostamenti aventi carattere pendolare sono quelli tra residenza e posto di lavoro e quelli tra residenza e scuola.

Gli spostamenti verso le attività commerciali e gli altri servizi urbani non seguono, in generale, uno schema di tipo pendolare e possono essere distribuiti più irregolarmente nell'arco della giornata; tuttavia, permane la caratteristica di alta frequenza, sopra tutto per gli spostamenti verso i servizi commerciali di beni di consumo giornaliero.

In tutti i tipi di spostamenti citati, si possono riconoscere gli elementi fondamentali per l'analisi della domanda di trasporto, che sono i seguenti:

- a. la generazione della domanda totale, cioè il problema dell'identificazione del tipo di popolazione interessata ai diversi tipi di spostamenti (per esempio, la popolazione attiva per gli spostamenti casa-lavoro; la popolazione in età scolare per gli spostamenti casa-scuola; tutta la popolazione per gli spostamenti verso gli altri servizi). In generale, la domanda totale effettiva non è ugua

le a tutta la popolazione interessata agli spostamenti considerati. L'aliquota di domanda effettivamente viaggiante è determinata da fattori che dipendono sia dalle caratteristiche socioeconomiche della popolazione sia dalle caratteristiche delle attività di destinazione. Ad esempio, l'aliquota della popolazione attiva che compie effettivamente spostamenti casa-lavoro è quella occupata; il tasso di occupazione dipende sia da caratteristiche intrinseche della popolazione (socioculturali) sia dalla disponibilità di posti di lavoro offerti nell'area. Analogamente, l'aliquota della popolazione in età scolare che compie effettivamente spostamenti casa-scuola è pressoché uguale alla popolazione in età per la fascia dell'obbligo, ma è minore per le fasce di età superiori; il tasso di scolarizzazione dipende sia da caratteristiche intrinseche della popolazione (socioculturali) sia dalla disponibilità di posti scuola (per tipo di scuola) offerti nell'area. Analogamente, ancora, benché tutta la popolazione possa accedere agli altri servizi, la frequenza degli spostamenti casa-altri servizi dipende sia da caratteristiche intrinseche della popolazione (socioculturali) sia dalla disponibilità ed articolazione dell'offerta;

- b. l'attrazione degli spostamenti, cioè il problema dell'identificazione dei tipi di attività che costituiscono le destinazioni del viaggio per i diversi tipi di spostamento. L'analisi dell'attrazione è, in generale, più semplice di quella della generazione e può ridursi all'identificazione della traduzione in termini quantitativi della capacità offerta da ciascuna destinazione. Ad esempio, nel caso dei viaggi casa-lavoro, una misura d'attrazione è data dal numero di posti di lavoro offerti nelle zone di destinazione. Nel caso dei viaggi casa-scuola, una misura d'attrazione è data dal numero dei

posti scuola offerti nelle zone di destinazione. Nel caso dei viaggi casa-altri servizi, una misura d'attrazione è data dalla dimensione dei servizi, opportunamente definita;

c. la distribuzione degli spostamenti, cioè il problema dell'identificazione dei fattori che determinano la scelta, da parte di ciascuna unità di domanda, di una particolare destinazione per un dato scopo di viaggio. I fattori che tipicamente entrano nella valutazione, da parte degli utenti, sono il tempo ed il costo, associati allo spostamento, anche intesi in senso generalizzato. Un esempio di componenti che intervengono a formare il costo generalizzato del trasporto è costituito, nel caso del mezzo pubblico, dalla tariffa, dal tempo di viaggio, dai tempi di attesa (legati, ovviamente, alla frequenza del mezzo), da eventuali tempi di interscambio nel caso di uso di più mezzi, dal comfort offerto dal mezzo ecc.. Un esempio di componenti che intervengono a formare il costo generalizzato del trasporto è costituito, nel caso del mezzo privato, dal costo del carburante e dell'uso dell'automezzo, dal tempo di viaggio (incluse tutte le soste), dal comfort offerto dal mezzo e da quello delle condizioni del traffico ecc..

Per il trattamento di questi problemi, si ricorre a modelli, per altro, ormai consolidati dalla tradizione. Essi sono tutti unificabili all'interno della famiglia dei modelli di interazione spaziale. Benché in uso, nelle applicazioni empiriche, da alcuni decenni, per una recente sistemazione teorica della materia, si può fare riferimento a: Wilson (1974), Domencich e McFadden (1975), IRES (1978), Bertuglia, Gallino e Tadei (1984).

Il modello più semplice di questa famiglia è il modello semplicemente vincolato e con generazione costante, dato da:

$$T_{ij} = P_i \frac{W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}}}, \quad (1)$$

ove:

i e j indicano, rispettivamente, la zona di origine e quella di destinazione;

T_{ij} è il numero di spostamenti tra i e j ;

P_i è la generazione totale di spostamenti da i (in questo caso, uguale alla popolazione totale);

W_j è una misura di attrazione della destinazione in j ;

c_{ij} è il costo generalizzato di trasporto tra i e j ;

α e β sono parametri non negativi da determinare sperimentalmente.

L'equazione (1) costituisce il modo più semplice di combinare insieme generazione, attrazione e distribuzione.

Sia la generazione sia l'attrazione sono considerate costanti e non richiedono un particolare modello (od una particolare procedura di calcolo).

L'effetto di distribuzione è introdotto tramite il termine di impedenza esponenziale e $e^{-\beta c_{ij}}$, funzione del costo generalizzato di trasporto.

In generale, si ammette che l'attrazione possa avere un'elasticità diversa da 1 (l'esponente α), per tenere conto di eventuali effetti di economie o diseconomie di scala (nel primo caso, $\alpha > 1$; nel secondo, $\alpha < 1$).

Il modello (1) è detto semplicemente vincolato in quanto, come si può facilmente verificare:

$$\sum_j T_{ij} = P_i;$$

cioè, esso assicura che il totale degli spostamenti aventi origine in i sia effettivamente uguale alla generazione totale P_i . Non è assicurata, però, una condizione analoga alle destinazioni.

Una prima complessificazione del modello semplicemente vincolato consiste nell'introduzione di una generazione totale non costante, ma variabile in funzione dell'accessibilità alle destinazioni.

La forma generale di tale modello è la seguente:

$$T_{ij} = P_i F(A_i) \frac{W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}}}, \quad (2)$$

in cui:

$$A_i = \sum_j W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}} \quad \text{è l'accessibilità totale dall'origine } i \quad (3)$$

$F(A_i)$ è una funzione non negativa, monotona e crescente.

A seconda del tipo di spostamento considerato, il termine $F(A_i)$ assume interpretazioni diverse.

Ad esempio, nel caso degli spostamenti pendolari casa-scuola, $F(A_i)$ indica la frazione di popolazione scolarizzata. In tal caso, vale la disuguaglianza

$$0 \leq F(A_i) \leq 1.$$

Nel caso degli spostamenti verso altri servizi (quali, per esempio, i servizi commerciali), il termine $F(A_i)$ assume il significato di frequenza con cui gli spostamenti vengono compiuti. In tal caso, $F(A_i)$ non deve soddisfare nessuna disuguaglianza particolare. Tuttavia, se si assume, come è lecito, che le frequenze siano limitate superiormente, in generale si può scrivere:

$$0 \leq F(A_i) \leq B,$$

ove B è un numero finito positivo.

Per la funzione $F(A_i)$, sono state proposte diverse specificazioni da vari autori. Una forma particolarmente conveniente, proposta in Leonardi (1982), è la seguente:

$$F(A_i) = \frac{A_i}{A_i + b}, \quad (4)$$

in cui b è una costante positiva da determinare sperimentalmente. La funzione (4) è rappresentata in fig. 1.

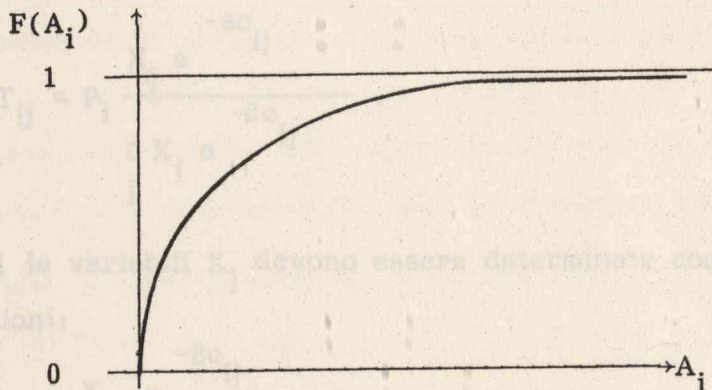


Figura 1 - Andamento della funzione (4).

Qualora la funzione (4) venga introdotta nella (2), essa assume la forma:

$$T_{ij} = P_i \frac{W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}} + b} \quad (5)$$

Il modello (5) ha una struttura altrettanto semplice di quella del modello (1). Tuttavia, in tal caso, la generazione totale non è più uguale alla popolazione totale, e, in generale:

$$\sum_j T_{ij} \leq P_i.$$

I modelli semplicemente vincolati permettono l'introduzione di ipotesi realistiche sulla generazione, ma trattano in modo semplificato l'attrazione.

Per poter trattare adeguatamente l'attrazione, occorre fare riferimento ai modelli di interazione spaziale doppiamente vincolati.

Il tipo più semplice di modello doppiamente vincolato è il seguente:

$$T_{ij} = P_i \frac{X_j e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j X_j e^{-\beta c_{ij}}} \quad (6)$$

in cui le variabili X_j devono essere determinate come soluzione delle equazioni:

$$\sum_i P_i \frac{X_j e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j X_j e^{-\beta c_{ij}}} = Q_j \quad (7)$$

in cui Q_j è l'attrazione totale in j , espressa in termini di numero totale di spostamenti che hanno destinazione in j .

La (7), pertanto, una volta risolta, assicura che il modello (6) rispetti non solo i vincoli di generazione totale, ma anche quelli di attrazione totale. Valgono, cioè, le due proprietà:

$$\sum_j T_{ij} = P_i$$

$$\sum_i T_{ij} = Q_j.$$

Il modello (6) può essere reso più complesso in vari modi. Può essere introdotta, anche in questo caso, la generazione totale non costante, in analogia con quanto fatto con il modello semplicemente vincolato (2). Inoltre, i vincoli di uguaglianza stretta per i totali alle destinazioni possono essere sostituiti con vincoli di disuguaglianza, tali cioè che sia:

$$\sum_i T_{ij} \leq Q_j.$$

Questa generalizzazione, sul lato dell'attrazione, è analoga all'introduzione della generazione variabile. Essa è giustificata nei casi in cui è lecito supporre che non tutta la capacità alle destinazioni sia usata, ma si abbia un'eccedenza rispetto alla domanda totale o, comunque, una possibilità di avere posti vacanti nelle destinazioni.

Esistono diversi modi di introdurre vincoli di disuguaglianza alle destinazioni.

Un modo è quello proposto in Jefferson e Scott (1979). Esso si basa sulla massimizzazione dell'entropia.

Un secondo modo è quello proposto in Leonardi (1982). Esso

si traduce nel modello:

$$T_{ij} = P_i \frac{(Q_j - T_j) e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j (Q_j - T_j) e^{-\beta c_{ij}} + b}, \quad (8)$$

in cui i T_j sono i flussi totali alle destinazioni e devono essere determinati come soluzione delle equazioni:

$$T_j = \sum_i P_i \frac{(Q_j - T_j) e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j (Q_j - T_j) e^{-\beta c_{ij}} + b}.$$

Si noti che il modello (8) ha sia la generazione sia l'attrazione variabile. In particolare, il termine di attrazione, che compare nella (8), cioè $(Q_j - T_j)$, non è altro che l'eccedenza di capacità in j .

Un terzo modo è quello proposto in Leonardi (1984). Esso si traduce nel modello:

$$T_{ij} = P_i \frac{Y_j e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j Y_j e^{-\beta c_{ij}} + b}, \quad (9)$$

in cui le variabili Y_j sono determinate come soluzione delle equazioni:

$$\sum_i P_i \frac{Y_j e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j Y_j e^{-\beta c_{ij}} + b} = Q_j [1 - e^{-\Psi_j(Y)}], \quad (10)$$

in cui le $\Psi_j(Y)$ sono definite come segue:

$$\Psi_j(Y) = \sum_i P_i \frac{e^{-\beta c_{ij}}}{\sum_j Y_j e^{-\beta c_{ij}} + b}.$$

Il modello (9) è derivato da un'interpretazione microeconomica delle interazioni tra domanda ed offerta, basata sulla teoria dell'utilità casuale. La (10) esprime condizioni di vincolo alle destinazioni analoghe a quelle definite dalla (7) per il modello doppiamente vincolato (6). La differenza consiste nel fatto che, mentre nella (7) i viaggi totali vengono esattamente uguagliati alla capacità in ogni destinazione, nella (10) i viaggi totali vengono uguagliati ad una aliquota di tale capacità. Il fattore

$$1 - e^{-\Psi_j(Y)}$$

assume, quindi, il significato di probabilità che una unità di capacità in j sia effettivamente occupata.

2.2. Interazioni tra domanda ed offerta di trasporto a scala urbana

Le interazioni tra domanda ed offerta di trasporto sono, essenzialmente, di due tipi:

- a. interazioni derivanti dalla tipologia e quantità di mezzi di trasporto disponibili nell'area, che si traducono nella ripartizione modale;
- b. interazioni derivanti dai limiti di capacità della rete di trasporto, con conseguenze quali la congestione e l'aumento dei tempi e co-

sti di viaggio, che si traducono nell'assegnazione del traffico alla rete.

Per quanto riguarda la ripartizione modale, esiste una consolidata tradizione di modelli di struttura analoga a quella dei modelli di domanda già discussi in 2.1..

In effetti, un modello di ripartizione modale si può considerare come una disaggregazione di un modello di domanda generale, che introduce, accanto alla scelta della destinazione, anche la scelta del mezzo di trasporto con cui recarvisi. Un primo approccio all'introduzione della ripartizione modale consiste nell'assumere come data esogenamente la matrice origini-destinazioni, che ad esempio può essere stimata con modelli di domanda del tipo descritto in 2.1., e nell'applicare a ciascun elemento della matrice una ulteriore disaggregazione per mezzo di trasporto. In termini matematici, ciò porta ad un modello del seguente tipo:

$$T_{ij}^k = T_{ij} \frac{e^{-\beta c_{ij}^k}}{\sum_k e^{-\beta c_{ij}^k}}, \quad (11)$$

in cui:

k è un indice associato ai diversi tipi di mezzi;

T_{ij}^k è il numero di spostamenti tra i e j con mezzo k ;

c_{ij}^k è il costo generalizzato di trasporto tra i e j con mezzo k .

Benché largamente usata nella pratica, la (11) pone alcuni problemi di coerenza con i modelli di domanda, in particolare per quel che riguarda i costi generalizzati di trasporto c_{ij}^k , che sono in generale diversi dagli analoghi costi di trasporto c_{ij} , non disaggregati

per mezzo, usati nei modelli di domanda.

Idealmente, i c_{ij} dovrebbero essere una media dei c_{ij}^k ponderata con le relative frequenze d'uso di ciascun mezzo, ma tali frequenze sono determinate dal modello di ripartizione modale e, quindi, possono essere note solo a posteriori, e non a priori, rispetto al modello di domanda. Per ovviare a questo inconveniente, sono state proposte diverse procedure che, in modo iterativo, correggono i c_{ij} in funzione della ripartizione modale.

Un'altra soluzione al problema consiste nell'uso di un modello integrato di domanda e ripartizione modale, che contenga simultaneamente sia la scelta della destinazione sia la scelta del mezzo di trasporto. A titolo di esempio, si dà qui la versione, integrata con la ripartizione modale, del modello semplicemente vincolato (1):

$$T_{ij}^k = P_i \frac{W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}^k}}{\sum_j W_j^\alpha \sum_k e^{-\beta c_{ij}^k}}. \quad (12)$$

Analoga generalizzazione può essere introdotta in tutti i modelli di domanda discussi in 2.1..

Si noti che il modello (12) implica una ben precisa regola di aggregazione dei costi qualora si imponga la sua coerenza con il modello (1). Infatti, sommando, rispetto a tutti i mezzi k , ambedue i membri della (12), si ottiene:

$$T_{ij} = P_i \frac{\sum_k W_j^\alpha e^{-\beta c_{ij}^k}}{\sum_j W_j^\alpha \sum_k e^{-\beta c_{ij}^k}}, \quad (13)$$

in cui:

$$T_{ij} = \sum_k T_{ij}^k \quad \text{spostamenti totali tra } i \text{ e } j.$$

La (13) coincide con la (1) se, e solo se, è verificata l'uguaglianza:

$$e^{-\beta c_{ij}} = \sum_k e^{-\beta c_{ij}^k},$$

ovvero:

$$c_{ij} = \frac{1}{\beta} \ln \sum_k e^{-\beta c_{ij}^k}. \quad (14)$$

La (14) stabilisce la regola di composizione dei costi generalizzati di trasporto, disaggregati per mezzo, in un unico costo di trasporto generalizzato medio. Si tratta, però, non di una media aritmetica, ma di una particolare media esponenziale.

La regola di composizione (14) è introdotta e largamente discussa in Williams (1977).

Per quanto riguarda l'assegnazione alla rete, la caratteristica principale dei modelli più recenti è quella di introdurre una dipendenza del costo generalizzato di trasporto dalla congestione sulla rete. In tal modo, i costi di trasporto non sono più costanti, ma variano in funzione delle condizioni di traffico. Benché non si tratti di veri e propri prezzi di mercato, in tali modelli i costi di trasporto agiscono come meccanismo equilibrante analogo ai prezzi. Un aumento di domanda di trasporto determina un aumento di congestione sulla rete, quindi un aumento dei costi di trasporto, e ciò provoca una riduzione della domanda. Cicli di questo tipo si ripetono più volte,

e ciò finché viene raggiunta una configurazione di equilibrio.

I più recenti modelli per l'assegnazione del traffico in equilibrio su una rete congestionata si basano sulla possibilità di formulare le condizioni di equilibrio come problema di programmazione matematica.

Un primo tipo di modelli assume che la domanda scelga il percorso sulla base del costo minimo. La forma generale di tale tipo di modelli è la seguente:

$$\min \sum_l \int_0^{f_l} c_l(x) dx \quad (15)$$

soggetto a:

$$\sum_r f_{ijr} = T_{ij} \quad (16)$$

$$\sum_{i,j,r} f_{ijr} \delta_{ijr}^l = f_l, \quad (17)$$

in cui:

l è un indice associato ai diversi tronchi della rete;

r è un indice associato ai diversi percorsi (successione di tronchi) sulla rete;

$c_l(x)$ è una funzione crescente specifica di ogni tronco l ed assume il significato di costo di percorrenza del tronco l , quando il flusso di traffico su tale tronco è x ;

f_{ijr} è il flusso di traffico tra i e j che usa il percorso r ;

δ_{ijr}^l è un coefficiente costante, che viene posto uguale ad 1 quando il tronco l appartiene ad un percorso r tra i e j e che viene posto uguale a 0 nel caso contrario;

f_1 è il flusso di traffico totale sul tronco 1.

E dimostrato in Beckmann, McGuire ed Winsten (1956) che la soluzione del programma matematico (15), (16) e (17) corrisponde ad un'assegnazione di traffico in equilibrio secondo il criterio del percorso di costo minimo.

Un secondo tipo di modelli assume che la domanda abbia una certa dispersione nella scelta dei percorsi e non si concentri unicamente sul percorso di costo minimo. Un esempio di tale tipo di modelli è quello proposto in Smith (1983). La forma generale di tale tipo di modelli è la seguente:

$$\min \sum_l \int_0^{f_1} c_l(x) dx + \frac{1}{\beta} \sum_{i,j,r} f_{ijr} \ln f_{ijr} \quad (18)$$

soggetta ai vincoli (16) e (17).

La (18) costituisce, pertanto, una lieve variante della (15), ottenuta aggiungendo un termine entropico relativo alla distribuzione dei flussi di traffico sui percorsi. Come è noto, l'introduzione di termini entropici nei problemi di programmazione matematica produce dispersione nella soluzione. E', infatti, dimostrato in Smith (1983) che la soluzione del problema (18), soggetto a vincoli (16) e (17), è data da

$$f_{ijr} = T_{ij} \frac{e^{-\beta c_{ijr}}}{\sum_r e^{-\beta c_{ijr}}}, \quad (19)$$

in cui:

$c_{ijr} = \sum_l \delta_{ijr}^l c_l(f_l)$ costo di percorrenza del percorso r tra i e j ,
ed f_l è dato dalla (17).

La (19) è formalmente identica al modello di ripartizione modale (11), qualora si sostituiscano i percorsi ai mezzi di trasporto. Tuttavia, va notato che la (19) non è una soluzione esplicita, ma un sistema di equazioni nelle incognite f_{ijr} , le quali, per via della definizione di c_{ijr} e della (17), compaiono anche nel termine a destra. Sono stati sviluppati vari metodi numerici per risolvere tali tipi di equazioni, quali quelli proposti da Bertuglia ed altri (1979), Sheffi e Daganzo (1980), Boyce ed altri (1983).

3. I TRASPORTI A SCALA INTERURBANA

Nonostante la diversità della scala e della tipologia della domanda, molti problemi di trasporto a scala interurbana possono essere affrontati con modelli identici a quelli descritti in 2..

In particolare, sono identici i modelli di domanda di trasporto, i quali, benché nati sopra tutto per spiegare spostamenti di tipo pendolare su brevi percorrenze, hanno dimostrato di spiegare anche spostamenti più irregolari e per percorrenze più lunghe, quali quelli tipici della scala interurbana. Un esempio è costituito da IRES, Assessorato regionale ai trasporti ed alla viabilità, ELC (1979). Altrettanto si può dire per i modelli di ripartizione modale ed assegnazione alla rete descritti in 2., che, nonostante la diversa tipologia dei mezzi di trasporto e della rete, sono applicabili anche alla scala interurbana. Un esempio è costituito da IRES ed ELC (1980).

L'unica vera differenza tra le due scuole, in campo metodologico, è costituita dal diverso modo di trattare il traffico di merci. Ciò non significa che, anche alla scala urbana, non si osservi traffico di merci. Tuttavia, è comune, nella tradizione dei modelli di trasporto della scala urbana, considerare il traffico di merci esclusivamente nella fase di assegnazione alla rete e come dato esogeno, che ha l'effetto di ridurre la capacità dei singoli tronchi, ma non è disaggregato per origini e destinazioni. Tale approccio è, in parte, giustificato dal fatto che la maggior parte del trasporto di merci è associato a transazioni commerciali su scala interurbana, che interessano i centri urbani o in quanto transito o in quanto origine o destinazione, ma raramente ambedue insieme. Proprio per questo fatto, passando alla scala interurbana, è necessario introdurre esplicitamente ta-

li interrelazioni, onde derivare il trasporto di merci dai flussi e dalle transazioni commerciali, che hanno luogo tra i diversi centri urbani di produzione e consumo. Nonostante questa considerazione, lo stato dell'arte circa appunto lo studio dei trasporti di merci è carente nella modellistica dei trasporti. Si può dire che gli unici modelli di transazioni commerciali interregionali sono stati prodotti completamente al di fuori del campo di studio dei trasporti. Essi sono, piuttosto, il risultato di studi dell'Economia Regionale e, inoltre, non hanno raggiunto un livello sufficiente di definizione operativa, che li renda immediatamente operabili.

Il più noto modello di commercio interregionale è dovuto, nella sua prima versione, a Samuelson (1952) e, in una versione più recente, a Takajama e Judge (1964). Si tratta di un modello di equilibrio generale delle importazioni-esportazioni e dei prezzi. Esso è formulato come problema di programmazione matematica. Benché di tale modello siano state costruite versioni che contemplan l'importazione e l'esportazione di più tipi di prodotti, qui per semplicità verrà introdotta la versione corrispondente ad un singolo tipo di prodotto che viene scambiato tra diversi punti di produzione e consumo, separati spazialmente (ad esempio: diverse aree urbane). Il modello è il seguente:

$$\max \sum_j \int_0^{q_j} \mu_j(z) dz - \sum_{ij} c_{ij} x_{ij} \quad (20)$$

soggetto a:

$$q_j = \sum_i (x_{ij} - x_{ji}), \quad (21)$$

in cui:

$\mu_j(z)$ è la funzione di domanda inversa in j , cioè il prezzo unitario del prodotto in j , espresso come funzione di una domanda netta (domanda totale meno produzione locale) z ;

q_j è la domanda netta in j ;

c_{ij} è il costo unitario di trasporto tra i e j ;

x_{ij} è il flusso di esportazioni da i a j .

La (20) prende il nome di beneficio totale ed è data dalla differenza tra il surplus dei consumatori ed il costo totale di trasporto. Il vincolo (21) impone una condizione di bilancio tra domanda, importazioni ed esportazioni, tale che la domanda netta in ogni j uguagli la differenza tra importazioni totali ed esportazioni totali.

Si dimostra che la caratteristica fondamentale della soluzione del problema (20) e (21) è quella di introdurre l'unidirezionalità dei flussi di esportazione e di importazione, cioè se si ha un flusso di esportazione da i a j non si può avere un flusso opposto da j ad i . Questa caratteristica, per quanto giustificabile come tendenza in termini di teoria economica, è chiaramente poco realistica rispetto a quanto si osserva empiricamente. Un modo per ovviare a tale inconveniente ed introdurre una maggiore dispersione nelle direzioni dei flussi è quello di aggiungere alla (20) un termine entropico per i flussi di esportazione ed importazione, in analogia con quanto è stato fatto nella (18) per il modello di assegnazione alla rete. Così facendo, la (20) si trasforma nella:

$$\max \sum_j \int_0^{q_j} \mu_j(z) dz - \sum_{ij} c_{ij} x_{ij} - \frac{1}{\beta} \sum_{ij} x_{ij} \ln x_{ij}. \quad (22)$$

Si dimostra in Bertuglia ed altri (1984) che la massimizzazione

della (22), soggetta al vincolo (21), ha, per i flussi di esportazione ed importazione, una soluzione della seguente forma:

$$x_{ij} = e^{\beta[(\mu_j - \mu_i) - c_{ij}] - 1} \quad (23)$$

La (23) mostra come le esportazioni da i a j siano una funzione crescente della differenza tra i prezzi in j ed in i e decrescente del costo di trasporto tra i e j .

Tra altri approcci all'analisi dei flussi commerciali interregionali, si può menzionare quello basato sulla disaggregazione spaziale di una matrice di transizioni intersettoriali a coefficienti costanti. Un tentativo in tale direzione è proposto da Sheppard (1983). Tale lavoro ha come punto di partenza un sistema di transazioni intersettoriali del tipo considerato in Sraffa (1960) e Morishima (1973), nel quale la disaggregazione spaziale viene introdotta combinando i coefficienti intersettoriali con un modello di interazione spaziale dello stesso tipo di quelli usati per la domanda di trasporto di persone, discussi in 2.1..

4. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Spostamenti di persone e di merci sono, ovviamente, presenti alla scala urbana ed a quella interurbana. Gli spostamenti di persone sono stati trattati, in modo ampio, con riferimento alla scala urbana. Come per altro già detto, gli stessi modelli valgono anche per la scala interurbana. Per studiare gli spostamenti di merci, non si può fare a meno di considerare la scala interurbana. Infatti, anche qualora si debba condurre uno studio sugli spostamenti di merci per una singola area urbana, e si voglia evitare di trattare le merci in modo aggregato, è necessario ampliare l'area di studio dal contesto urbano ad un contesto interurbano per poter ottenere una corretta comprensione e modellazione del fenomeno. Infatti, gli studi sugli spostamenti di merci, e non a caso, fanno generalmente riferimento alla scala interurbana.

Queste considerazioni, per altro già avanzate in 1., spiegano la struttura del saggio.

Per quanto concerne gli sviluppi futuri, si può dire che lo stato dell'arte è soddisfacente per quanto riguarda i modelli relativi agli spostamenti di persone, ormai giunti ad un livello di operatività molto avanzato. Si possono, tuttavia, individuare, negli approcci correnti, due lacune di natura metodologica:

- a. tutti i modelli considerati, dalla domanda all'assegnazione alla rete, sono statici ed hanno come obiettivo la riproduzione del traffico in condizioni di equilibrio;
- b. i modelli di trasporto vengono, solitamente, usati in modo settoriale, cioè assumendo come dati esogenamente l'uso del suolo e la localizzazione delle attività economiche.

Queste due considerazioni suggeriscono, come linee di sviluppo futuro, l'introduzione di aspetti dinamici, sopra tutto per quel che concerne i modelli di domanda di trasporto, e l'integrazione dei modelli di trasporto in un sistema globale, che permetta l'introduzione esplicita delle interrelazioni tra i trasporti e la localizzazione delle attività. Per quanto concerne l'introduzione degli aspetti dinamici, stiamo conducendo uno studio pluriennale nell'ambito del Progetto Finalizzato Trasporti: "Sistema di modelli integrati di trasporto". Per quanto concerne l'integrazione dei modelli di trasporto in un sistema globale, stiamo conducendo uno studio pluriennale nell'ambito del Progetto Finalizzato Trasporti: "Interrelazioni localizzazioni - trasporti".

Per quanto riguarda gli spostamenti di merci, lo stato dell'arte è carente, e sopra tutto non ha raggiunto sufficienti livelli di operatività, neppure per la soluzione di problemi statici e di equilibrio generale. Sembra, quindi, auspicabile come sviluppo futuro un miglioramento di tale stato dell'arte che porti i modelli di spostamenti di merci almeno al livello già raggiunto per i modelli di spostamenti di persone.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

Beckmann M.J., McGuire C.B., Winsten C.B. (1956) Studies in the Economics of Transportation, Yale University Press, New Haven, Conn..

Bertuglia C.S., Filardo V., Leonardi G., Pesci R., Rabino G.A., Tadei R. (1979) Una proposta metodologica per la formazione dei piani comprensoriali dei trasporti, Ricerca Operativa, 9, 11, 69-85.

Bertuglia C.S., Gallino T., Tadei R. (1984) SMIT - Sistema di modelli integrati di trasporto. Procedura per l'uso: manuale e software, Working Paper 41, IRES, Torino.

Bertuglia C.S., Leonardi G., Occelli S., Rabino G.A., Tadei R. (1984) Location-Transport Relationships: State-of-the-Art, Unifying Efforts and Future Developments, Working Paper 32, IRES, Torino.

Boyce D.E., Chon K.S., LeBlanc L.J., Lee Y.J., Lin K.T. (1983) Implementation and Computational Issues for Combined Models of Location, Destination, Mode, and Route Choice, Environment and Planning A, 15, 1219-1230.

Domencich T., McFadden D. (1975) Urban Travel Demand. A Behavioural Analysis, North-Holland, Amsterdam.

IRES (1978) Metodologia per la formazione dei piani comprensoriali di trasporto, volumi 2, Torino.

IRES, Assessorato regionale ai trasporti e alla viabilità, ELC (1979) Politiche di comunicazione in valle di Susa in relazione all'apertura del traforo stradale del Fréjus, Angeli, Milano.

IRES, ELC (1979) Piano per le comunicazioni stradali verso il Sem-pione, Torino.

Jefferson T.R., Scott C.H. (1979) The Analysis of Entropy Models with Equality and Inequality Constraints, Transportation Research 13B, 123-132.

- Leonardi G. (1982) A Multiactivity Location Model with Accessibility - and Congestion - Sensitive Demand, Sistemi Urbani, 4, 267-310.
- Leonardi G. (1984) Asymptotic Approximations of the Assignment Model with Stochastic Heterogeneity in the Matching Utilities, in Atti delle Giornate di Lavoro AIRO 1984, vol. 2., 1083-1109.
- Morishima M. (1973) Marx's Economics. A Dual Theory of Value and Growth, Cambridge University Press, Cambridge.
- Samuelson P.A. (1952) Spatial Price Equilibrium and Linear Programming, American Economic Review, 42, 283-303.
- Sheffi Y., Daganzo C.F. (1980) Computation of Equilibrium over Transportation Networks: The Case of Disaggregate Demand Models, Transportation Science, 14, 155-173.
- Sheppard (1983) A Marxian Model of the Geography of Production and Transportation in Urban and Regional Systems, in Bertuglia C.S., Leonardi G., Occelli S., Rabino G.A., Tadei R. (eds.), Location-Transport Relationships: State-of-the-Art, Unifying Efforts and Future Developments, Torino.
- Smith T.E. (1983) A Cost-Efficiency Theory of Dispersed Network Equilibria, in Bertuglia C.S., Leonardi G., Occelli S., Rabino G.A., Tadei R. (eds.) Location-Transport Relationships: State-of-the-Art, Unifying Efforts and Future Developments, Torino.
- Sraffa P. (1960) The Production of Commodities by Means of Commodities, Cambridge University Press, Cambridge.
- Takayama T., Judge G.G. (1964) Equilibrium among Spatially Separated Markets, Econometrica, 32, 510-524.
- Williams H.C.W.L. (1977) On the Formation of Travel Demand Models and Economic Evaluation Measures of User Benefit, Environment and Planning A, 9, 285-344.
- Wilson A.G. (1974) Urban and Regional Models in Geography and Planning, Wiley, Chichester.

WORKING PAPERs

- *1 "Un modello urbano a larga scala per l'area metropolitana di Torino", *gennaio 1981*
- *2 "Metodologie per la pianificazione dei parchi regionali", *gennaio 1981*
- *3 "A Large Scale Model for Turin Metropolitan Area", *maggio 1981*
- *4 "An Application to the Ticino Valley Park of a Mathematical Model to Analyse the Visitors Behaviour", *luglio 1981*
- *5 "Applicazione al parco naturale della Valle del Ticino di un modello per l'analisi del comportamento degli utenti: la calibrazione del modello", *settembre 1981*
- *6 "Applicazione al parco naturale della Valle del Ticino di un modello per l'analisi del comportamento degli utenti: l'uso del modello", *settembre 1981*
- *7 "Un'analisi delle relazioni esistenti tra superficie agricola utilizzata ed alcune principali grandezze economiche in un gruppo di aziende agricole piemontesi al 1963 e al 1979", *settembre 1981*
- *8 "Localizzazione ottimale dei servizi pubblici, con esperimenti sulle scuole dell'area torinese", *settembre 1981*
- *9 "La calibrazione di un modello a larga scala per l'area metropolitana di Torino", *ottobre 1981*
- *10 "Applicazione al parco naturale della Valle del Ticino di un modello per l'analisi del comportamento degli utenti: l'individuazione di un indicatore di beneficio per gli utenti ed una analisi di sensitività su alcuni parametri fondamentali", *ottobre 1981*
- *11 "La pianificazione dell'uso ricreativo di aree naturali: il caso del parco della Valle del Ticino", *novembre 1981*
- *12 "The Recreational Planning of Country Parks: the Case Study of the Ticino Valley Park", *marzo 1982*
- *13 "Alcuni aspetti della calibrazione di un modello dinamico spazializzato: il caso del modello dell'area metropolitana torinese", *settembre 1982*
- *14 "L'applicazione di un modello dinamico a larga scala per l'area metropolitana di Torino: la calibrazione", *novembre 1982*
- *15 "Modello commerciale Piemonte", *novembre 1982*
- *16 "Resource allocation in multi-level spatial health care systems: benefit maximisation", *dicembre 1982*
- *17 "Relazione sulla struttura e sulla dinamica del settore elettromeccanico piemontese", *dicembre 1982*
- *18 "Evoluzione della finanza locale in Piemonte e in Italia 1977 - 1981", *febbraio 1983*
- *19 "Un metodo per l'analisi di scenari multidimensionali in ordine alle relazioni tra domanda di trasporto e variabili strutturali dei sistemi economici e territoriali", *febbraio 1983*
- 20 "Modello commerciale Piemonte", *marzo 1983*
- *21 "Calibrating the residential location submodel of the simulation model for the Turin metropolitan area", *giugno 1983*
- *22 "Dinamiche spaziali dell'area metropolitana di Torino negli ultimi tre decenni", *giugno 1983*
- *23 "Struttura economica delle imprese del dettaglio alimentare in Piemonte - prime valutazioni", *luglio 1983*
- *24 "The dynamics of Turin metropolitan area: a model for the analysis of the processes and for the policy evaluation", *agosto 1983*
- 25 "Un'analisi, con il modello RAMOS, della struttura spaziale del servizio sanitario regionale: il caso del Piemonte", *settembre 1983*
- 26 "Manuale per l'uso del modello RAMOS (Resource Allocation Model Over Space)", *settembre 1983*
- 27 "The spatial dynamics of the Turin metropolitan area: an analysis of the last three decades", *ottobre 1983*
- *28 "Un modello del sistema urbano di Torino: alcune valutazioni di un'esperienza modellistica", *novembre 1983*
- *29 "Il conto economico dei comparti manifatturieri piemontesi, 1980 - Elaborazioni su dati rilevati dall'ISTAT sul Prodotto Lordo delle imprese manifatturiere con sede sociale in Piemonte", *novembre 1983*
- 30 "Interrelazioni tra localizzazioni e trasporti: stato dell'arte e possibili linee di sviluppo futuro", *gennaio 1984*
- 31 "Fondamenti per un approccio unificante all'analisi del comportamento della domanda in un sistema localizzazioni-trasporti", *gennaio 1984*

- 32 "Location-transport relationships: state-of-the-art, unifying efforts and future developments", *maggio 1984*
- *33 "Modelli di allocazione spaziale delle risorse sanitarie: la ricerca in corso all'IRES di Torino", *maggio 1984*
- *34 "Modelli per la determinazione delle aree di intervento dei servizi di emergenza", *giugno 1984*
- *35 "Aspetti metodologici e proposta di modello di clustering dinamico per la identificazione di aree omogenee sanitarie", *settembre 1984*
- *36 "Models for health care planning: the case of the Piemonte Region", *ottobre 1984*
- *37 "The potential for day hospitals in Piemonte. A feasibility study", *ottobre 1984*
- *38 "Il principio di equità nella localizzazione degli ospedali: una sperimentazione del modello RAMOS⁻¹ al caso del Piemonte", *ottobre 1984*
- *39 "Manuale per l'uso del modello RAMOS⁻¹", *ottobre 1984*
- 40 "Il modello IRES per l'area metropolitana di Torino: struttura formale, base di dati, uso per la pianificazione", *novembre 1984*
- 41 "SMIT — Sistema di modelli integrati di trasporto. Procedura per l'uso: manuale e software", *dicembre 1984*
- 42 "Teorie di localizzazione di servizi, con particolare riferimento all'esperienza italiana", *gennaio 1985*
- 43 "Analisi di produttività e costo dei servizi ospedalieri pubblici in Piemonte", *gennaio 1985*
- 44 "Progetto di modello integrato per l'analisi dinamica delle interrelazioni localizzazioni-trasporti", *febbraio 1985*

ires

ISTITUTO RICERCHE ECONOMICO - SOCIALI DEL PIEMONTE
VIA BOGINO 21 10123 TORINO